

## **ДЕФОРМАЦИОННЫЙ СТРУКТУРНЫЙ ПЕРЕХОД И АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРУЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО АЛЮМИНИЯ**

**Макаров С.В., Плотников В.А.**

*Алтайский государственный университет,  
г. Барнаул, Россия, E-mail: makarov@phys.asu.ru*

Характерно, что при деформировании многих металлов и сплавов отмечаются скачкообразные эффекты накопления деформации [1,2]. Например, естественным откликом алюминиево-магниевого сплава на механическое нагружение является прерывистая текучесть, проявляющаяся в формировании полос деформации в области локализации пластической деформации [2]. Прерывистая текучесть на зависимости напряжение – деформация представляет собой скачки (зубцы) напряжения, причем полоса деформации, ответственная за акты прерывистой текучести, является макроскопическим объектом и развивается из критического зародыша полосы.

Прерывистая текучесть сопровождается импульсами акустической эмиссии, коррелирующие с появлением полос деформации, причем каждому скачку напряжений соответствует импульс акустической эмиссии [2,3].

Другим проявлением прерывистой текучести является прерывистая ползучесть (или эффект Савара-Массона [4]), реализующаяся в сплавах на кривых ползучести в виде последовательности скачков деформации [5]. Сделан вывод, что деформационный скачек представляет собой пространственную и временную организацию деформационных полос, характеризующую пластическую неустойчивость нагруженного материала [5].

В наших исследованиях было показано, что характер накопления деформации в алюминии и алюминиево-магниевом сплаве в области низких температур – монотонный, в области высоких температур – квазискачкообразный [6, 7]. В этой связи целью данной работы является проведение анализа деформации и акустической эмиссии в условиях высокотемпературного нагружения технического алюминия и двойственного характера накопления деформации.

### **Экспериментальные результаты**

Экспериментальная методика исследований приведена в работе [8]. Согласно этой методике эксперименты представляли собой механическое нагружение алюминиевых образцов, нагрева их до высоких температур, регистрации величины накопленной деформации и акустической эмиссии в условиях мягкой схемы механического воздействия в одном временном масштабе. Накопление деформации при нагреве образца до 620 °С и действии нагрузки 25 МПа осуществляется двояким образом: монотонным (область 1) – в области низких температур до 400 °С и скачкообразным (область 2) – в интервале температур 400–620 °С. При переходе от области 1 к области 2 (при некоторой критической температуре перехода  $T_{кр}$ ) значительно увеличивается скорость накопления деформации и среднеквадратичное напряжение акустической эмиссии (рис.1). В высокотемпературной области 2 механическое напряжение начинает осциллировать, а амплитуда осцилляций хорошо коррелирует со скоростью накопления деформации. Осцилляции механического напряжения согласно [5] есть реакция системы машина-образец на скачки деформации, то есть наблюдаемый в экспериментах квазискачкообразный характер накопления деформации действительно представляет последовательность деформационных скачков разделенных малыми монотонными промежутками.

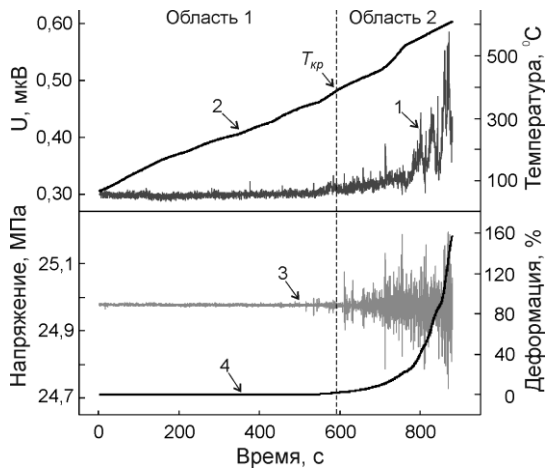


Рисунок 1 – Акустическая эмиссия (1), температура (2), механическое напряжение (3) и накопление деформации (4) при нагреве алюминия (механическое напряжение в цикле 25 МПа)

переходе из области 1 в область 2, а также значительному увеличению колебательной энергии акустической эмиссии в области 2 может свидетельствовать о деформационном структурном переходе при термомеханическом нагружении материала.

Деформационный структурный переход представляет собой переход от накопления деформации, контролируемой термически активируемым переполнением дислокаций [9], к накоплению деформации, контролируемым зернограничными процессами производства полных (решеточных) дислокаций на тройных зернограничных стыках [10].

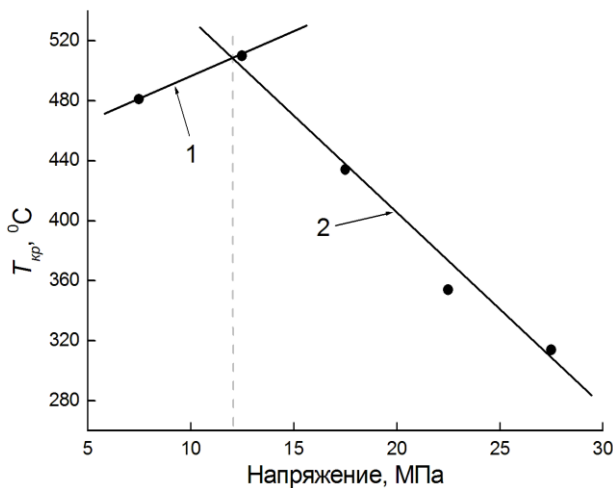


Рисунок 2 – Зависимость граничной температуры деформационного структурного перехода от механического напряжения в циклах: 1 – температурная область накопления деформации, контролируемая переполнением дислокаций; 2 – температурная область накопления деформации, контролируемая зернограничными процессами

реализуется лишь при достижении механическими напряжениями некоторого критического значения. В нашем случае величина критического напряжения составляет примерно 12 МПа. Для реализации деформационного структурного перехода в нашем случае из области 1 в область 2 величина колебательной энергии акустической эмиссии также должна быть критической.

Переход к осцилляции механического напряжения может свидетельствовать о существенном изменении микромеханизма накопления деформации, а увеличение амплитуды акустических импульсов по мере повышения температуры характеризует увеличение колебательной энергии акустической эмиссии в объеме деформируемого материала.

Проведенный анализ смены механизма накопления деформации при переходе из области 1 в область 2 в техническом алюминии показал (рис.2), что температура перехода зависит от механического напряжения как функция с максимумом.

Совокупность полученных данных по осцилляциям механического напряжения в области 2, граничным температурно-силовым параметрам процесса, изменению скорости накопления деформации при

На рисунке 2 «левая» и «правая» ветви этой зависимости аппроксимированы линейными функциями. Зависимость 1 на рисунке 2 характеризует температуру деформируемого объема, обеспечивающей диффузионно-контролируемый приток дислокаций путем переполнения в активированную плоскость скольжения при заданном уровне механического напряжения. Зависимость 2 на рисунке 2 характеризует температуру, при которой начинается продуцирование полных дислокаций за счет зернограничных механизмов, обеспечивающих существенно возросшие величину и скорость накопления деформации.

Собственно температура деформационного структурного перехода как функция механического напряжения это зависимость 2 на рисунке 2. То есть такой переход

Накопление энергии акустической эмиссии возможно лишь путем формирования стоячих акустических волн путем преобразования первичных сигналов (точнее волновых пакетов) акустической эмиссии на естественных резонаторах в деформируемом объеме образца [11].

Таким образом, деформационный структурный переход в техническом алюминии происходит при достижении механическим напряжением, температурой и энергией акустической эмиссии некоторых критических значений, являясь результатом совместного действия тепловых флуктуаций, статических смещений атомов в поле механических напряжений и динамических смещений в поле стоячих акустических волн, сформированных на естественных резонаторах деформируемого объема образца первичными сигналами акустической эмиссии.

**Список литературы:**

1. Песчанская Н.Н., Шпейзман В.В., Синани А.Б. Смирнов Б.И. Скачки деформации микронного уровня на разных стадиях ползучести кристаллических тел // ФТТ. 2004. Т. 46. №11. С. 1991-1995.
2. Криштал М.М. Особенности образования полос деформации при прерывистой текучести // ФММ, 1993. Т. 75, №5. С. 31-35.
3. Криштал М.М., Мерсон Д.Л. Взаимосвязь макролокализации деформации, прерывистой текучести и особенностей акустической эмиссии при деформировании алюминиево-магниевых сплавов // ФММ, 1996. Т. 81, № 1. С. 156-162.
4. Шибков А.А., Кольцов Р.Ю., Желтов М.А., Шуклинов А.В., Лебедин М.А. Известия РАН. Серия физ. 2006. Т. 20. № 9. С. 1372-1376.
5. Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А., Гасанов М.Ф., Денисов А.А. Макролокализация пластической деформации при прерывистой ползучести алюминий-магниевого сплава АМг6 // ЖТФ, 2014. Т. 84. №4. С. 40-46.
6. Плотников В.А., Макаров С.В. Деформационные эффекты и акустическая эмиссия при высокотемпературной деформации алюминия // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. № 6. С. 65-72.
7. Макаров С.В., Плотников В.А., Колубаев Е.А. Деформационное поведение алюминиево-магниевого сплава в условиях термомеханического нагружения // Известия АлтГУ. 2015. № 2. С. 36-39.
8. Макаров С.В., Плотников В.А. Об акустических эффектах корреляции элементарных деформационных актов в металлических материалах при высокотемпературном переходе // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 10. С. 21-25.
9. Мышляев М.М. Ползучесть полигонизованных структур. – Несовершенства кристаллического строения и мартенситные превращения. М: Наука, 1972. С. 194-234.
10. Гудкин М.Ю., Овидько И.А., Скиба Н.В. Зернограничное скольжение и эмиссия решеточных дислокаций в нанокристаллических материалах при сверхпластической деформации // ФТТ, 2005. Т. 47 № 9. С. 1602-1613.
11. Макаров С.В., Плотников В.А., Потекаев А.И. Спектральная плотность сигналов акустической эмиссии и макроскопическая корреляция деформационных актов в слабоустойчивом состоянии кристаллической решетки при высокотемпературном нагружении алюминия // Известия вузов. Физика. 2014. №7. С. 81-86.